



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTONOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE INGENIERÍA



DIVISIÓN DE INGENIERÍAS CIVIL Y GEOMÁTICA
DEPARTAMENTO: PLANEACIÓN, SISTEMAS Y
TRANSPORTE

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN: EL FERROCARRIL Y EL MEDIO AMBIENTE

Asignatura: Ferrocarriles
Clave de asignatura: 30061
Semestre: 2022-02



Alumno: Méndez Serrano Maximiliano Adair
Profesor: DR. JAIME DE JESUS PAREDES CAMACHO
Fecha de entrega: 17/05/2022

Conclusiones

Como se puede observar en este documento la construcción, ampliación, mantenimiento y operación de una red ferroviaria implica una gran cantidad de impactos ambientales.

Pero para estos impactos se les puede mitigar con una planeación y aplicación correcta como es el caso de la contaminación acústica que genera el paso del tren por la fricción entre las ruedas y las vías, estas medidas son variadas y pueden ser tan sencillas como la construcción de barreras que no solo ayuden con la contaminación acústica sino que reduzcan el número de accidentes en las vías por ser una barrera física que separa la red ferroviaria de los demás modos de transporte como es el sistema carretero.

En cuanto a las emisiones contaminantes del transporte ferroviario se pudo mostrar una metodología para poder realizar el cálculo de las emisiones generadas por todos los componentes del sistema, con esto se puede tener una idea de cuanto se afecta el planeta por el uso y desarrollo del sistema, pero esto se tiene que comparar con los otros modos de transporte porque solo conocer cuanto afecta sin un margen de comparación no resulta productivo.

Para este se mostró la información compartida en la conferencia que inspiró a este proyecto de investigación, donde se mostró una comparación clara de emisión de contaminantes con el sistema carretero en el corredor ciudad de México- Montreal mostrando que el transporte por ferrocarril resultó ser cerca de 10 veces menos contaminante que el mismo recorrido con camiones de carga.

Finalmente se mostraron las tendencias futuras que todas muestran a una tendencia a no depende de combustibles fósiles y optar por fuentes de energía renovables.

Para cerrar este documento se puede decir que con todo lo anterior se logró conocer cómo afecta negativamente al ambiente el ferrocarril, como se puede mitigar este daño, como se compara a otro medio de transporte y lo que puede deparar al futuro en el que la importancia por el medio ambiente sea mayor.

Contenido

Introducción.	1
Historia del Ferrocarril.	4
Locomotoras de Vapor.	4
La locomotora Stephenson	5
Locomotoras Eléctricas.	5
Locomotoras Diesel-Eléctricas.	6
Estudio de impacto: Contaminación acústica.	6
Mapa de Ruido.	9
Normativa y legislación en temas acústicos.	10
Organización Mundial de la Salud (OMS).....	10
Normativa Nacional.....	11
El ruido de origen ferroviario.	12
Ruido Producido por el desplazamiento del tren.....	13
Efectos de la Corrugación	13
Ruido de Impacto	14
Ruido en Curvas	14
Características del ruido Ferroviario.	14
Medidas de control del ruido del ferrocarril.....	15
Barreras acústicas de altura completa	16
Barreras acústicas de baja altura.	17
Conclusiones del estudio	17
Estudio de impacto: Evaluación de huella de carbono.	18
Indicadores de medición.....	18
Energía primaria	18
CO ₂	18
Partículas PM ₁₀ y PM _{2.5}	18
Compuestos orgánicos volátiles que no son metano (NMVOC).....	18
Óxidos de Nitrógeno	19
Consideraciones para realizar el modelaje	19
Modelación de impacto de la infraestructura	20
Modelación de impacto del material rodante.	21
Modelación de impacto de operación del tren,	21
Datos y tablas importantes para el análisis.	21
Trabajos de terracería.....	22

Puentes.....	23
Túneles.....	24
Balastos y durmientes.....	24
Rieles.....	25
Mástil, catenarias y cable colgante.....	25
Señalización y comunicación	26
Construcción y mantenimiento de edificaciones.....	27
Construcción y mantenimiento de trenes	28
Operación del tren y alimentación de energía	29
El ferrocarril en comparación al autotransporte.	30
Ventajas del ferrocarril respecto al autotransporte.....	30
Estudio: Greening North American Transportation Corridors	31
Tendencias futuras del ferrocarril en el tema ambiental.....	32
Conclusiones.....	1
Referencias	33

Introducción.

Este trabajo de investigación se centro en la recopilación de información relevante acerca del ferrocarril y su impacto en el medio ambiente, para esto se contó con la información encontrada en tesis, libros, sitios web, estudios y conferencias del tema.

La finalidad de este trabajo se centra en generar consciencia de los métodos que se pueden realizar para los diferentes impactos ambientales que tiene el ferrocarril, desde su la construcción de líneas, su mantenimiento y finalmente la disposición de sus componentes que ya cumplieron su vida útil. Así mismo busca mostrar evidencia que permita comparar que tan amigable es al medioambiente el ferrocarril contra el autotransporte.

Antes de iniciar propiamente con el trabajo de investigación quisiera dar la razón por la que quise tocar este tema para la clase de Ferrocarriles, esto fue debido a la conferencia de Maestra Gabriela García: “El ferrocarril, un pequeño aliado en el freno del cambio climático” la cual vi antes de tomar la clase de Ferrocarriles, en cierta manera ese fue el primer avance a los temas que más me han llamado la atención de mi carrera de Ingeniería Civil: El impacto ambiental y los ferrocarriles.

Historia del Ferrocarril.

La historia del ferrocarril es una parte crítica que se tiene que conocer para lograr comprender el impacto ambiental que ha tenido su desarrollo a lo largo de los siglos.

A continuación, se mostrará un breve resumen de la historia de las diferentes locomotoras que se han utilizado como fuente de energía para el movimiento de los ferrocarriles.

Locomotoras de Vapor.

Las locomotoras de vapor se tratan de los primeros motores que no utilizaban la fuerza motriz de animales para el movimiento de los vehículos. Su principal característica se centra en que funcionan en base a un motor de vapor.

De los primeros registros que se tienen que el ser humano haya utilizado la energía del vapor viene de un libro egipcio llamado "*Spiritualia Seu Pneumática*" en el cual se describían los mecanismos de una especie de juguete conocido como *aelopile*, el cual consistía en una caldera con una tapadera muy ajustada y coronada por un par de columnas adornadas con una bola hueca de metal que giraba entre las columnas, hasta llenar una esfera que permitía la liberación del gas hacia la atmosfera.



Imagen 1 Aelopile.

Después de esto pasaron cientos de años antes de que la humanidad pudiera utilizar a gran escala la energía que se puede obtener del movimiento genera el vapor de agua.

En Inglaterra se desarrollaron los primeros trenes de vapor, pero no fue un inglés la primera persona que colocó un generador de vapor a la caldera de una locomotora, este honor lo tiene el francés Marc Seguir, aunque el invento de la caldera utilizada (Una caldera multitubular) si fue un inglés cuyo nombre fue James Neville.

Después de que Marc Seguir haya aplicado el motor de vapor la persona que lo perfeccionó hacia las locomotoras fue el empresario inglés George Stephenson que en 1823 instaló su fábrica en Newcastle para la fabricación de sus locomotoras bautizadas como "Killinsworth".

Estas primeras locomotoras solo podían alcanzar una velocidad de casi veinte kilómetros por hora y presentaban muchos inconvenientes como un traqueteo excesivo en los carros y en caso de pasar por un lugar cerrado como túneles se corría un riesgo alto de asfixia por la alta concentración de humo que emitían.

Ahora se tocará el tema de la locomotora de Stephenson.

La locomotora Stephenson

En el año de 1829 los directivos de Liverpool a Manchester ofrecieron un premio de 500 libras esterlinas a la máquina de vapor más perfeccionada que pueda transitar en la vía, esto a través de una serie de pruebas realizadas en octubre de 1829 la cual ganó por una diferencia considerable a la locomotora de vapor "Rocket" de George Stephenson. El éxito de la locomotora Rocket se debió a que tuvo una caldera multitubular.



Imagen 2 La locomotora Stephenson mostrada en un museo de Inglaterra.

Sin embargo, hay que aclarar que la Rocket no fue la primera locomotora, la primera hizo su aparición en el año de 1804 y fue construida por el ingeniero inglés Richard Trevithick, se trataba de una locomotora que funcionaba con vapor de baja presión y no se encontraba al tránsito sobre rieles, esta podía andar por cualquier camino.

Locomotoras Eléctricas.

La primera demostración de una locomotora eléctrica fue realizada por Werner Von Siemens en 1879 en Berlín Alemania, esta locomotora se le acredita como el primer tren de pasajeros que trabajó de forma eléctrica. Pero tuvieron que pasar décadas para que esta tecnología llegara a América.

A General Electric se le atribuye con el primer uso de una locomotora eléctrica para cargas pesadas cuando en 1893 crearon una locomotora de 30 toneladas que funcionaba con corriente alterna.

General Electric fue el principal proveedor de locomotoras eléctricas mientras se desarrolló la tecnología que la reemplazaría eventualmente y se considera que hasta el año 1950 fue sustituida por las locomotoras Diesel-Eléctricas

Locomotoras Diesel-Eléctricas.

Actualmente se tratan del principal tipo de locomotoras usadas en el mundo, pero esto no siempre fue así la historia de las locomotoras a pesar de ser solamente del siglo XIX en adelante ha sido bastante amplia y como se tocó en los temas anteriores se desarrollaron las tecnologías de la locomotora eléctrica. Pero esto solo fue un paso para llegar la locomotora que se hablara a continuación: La diesel-electrico

En los años de 1918 ya se estaba buscando un nuevo avance que remplazara a las locomotoras de vapor que para ese entonces ya casi llevaban un siglo en funcionamiento, y al menos en el continente americano, específicamente en los Estados Unidos la compañía American Locomotive Company (ALCO) se unió a otras dos compañías (Ingersoll-Rand y General Electric) para lograr diseñar una locomotora que funcionara en base a diésel.

De esta unión surgió el GM-50. El primer vehículo diesel-electrico en utilizarse en las vías férreas, y para el año de 1924

Estudio de impacto: Contaminación acústica.

Para complementar este trabajo de investigación se utilizó la tesis de maestría en vías terrestres de Monitoreo y mitigación acústica en aeropuertos y vías férreas de Ismael Albino Jaramillo de la Universidad Autónoma de Chihuahua.

Uno de los impactos ambientales que tiene el sistema ferroviario durante su operación es la emisión constante de contaminación sonora, ya que la contaminación acústica producida por el paso del ferrocarril en áreas urbanas es un problema bastante serio.

La zona de estudio del sector ferroviario de la maestría se trata de un corredor de longitud de 2 km de la vía ferroviaria de Chihuahua a Cd. Juárez desde el panteón municipal III hasta la Vialidad de los nogales en Avenida Venceremos de la ciudad Chihuahua.

Para poder conocer bien el impacto ambiental que genera la contaminación acústica se debe de conocer al menos los atributos básicos del sonido, los cuales son:

- Nivel o amplitud del sonido.
 - Se trata del nivel sonoro en el cual a mayor valor (mayor amplitud= se tendrá una mayor sensación auditiva, y se mide en la unidad del sistema internacional de presión, el Pascal. También se tiene que conocer que hay un umbral mínimo para la percepción auditiva y un umbral máximo del cual no se puede superar sin correr el riesgo de perder la forma permanente la capacidad auditiva.
- Frecuencia.
 - Se trata del número de vibraciones o de variaciones de la presión acústica por segundo, dando la sensación de tonalidad. En base a la frecuencia se categorizan los sonidos en graves y agudos en base a su nivel de frecuencia.

- Longitud de Onda.
 - Se trata de la distancia en metros que una onda acústica ocupa en el medio por donde se propaga, esta distancia depende de tres componentes: velocidad del sonido, el medio de propagación y la frecuencia.
- Velocidad del sonido.
 - Se trata de la velocidad a la que se desplazan las ondas sonoras en un medio.
- Medida del nivel sonoro.
 - La unidad de medida del nivel sonoro es el decibel y para una correcta de medición adecuada para la presión del sonido se deberían usar mPa o μPa
- Intensidad Sonora.
 - La intensidad del sonido en una dirección específica en un punto del campo sonoro es igual al flujo de energía sonora a través de una unidad de área en ese punto (potencia por unidad de área que influye a través del punto), siendo la unidad de área perpendicular a la dirección especificada.
- Potencia Sonora
 - La fuerza o capacidad de hacer ruido de una máquina se evalúa con su potencia sonora, esto nos permite calcular el nivel de presión acústica en cualquier punto situado ya sea en un espacio cerrado o abierto.

Para el caso de los ferrocarriles como una fuente sonora se trata de una fuente lineal o cilíndrica debido a que como fuente sonora tienen una dimensión de magnitud más grande que el resto (la dimensión en la que se mueve la vía).

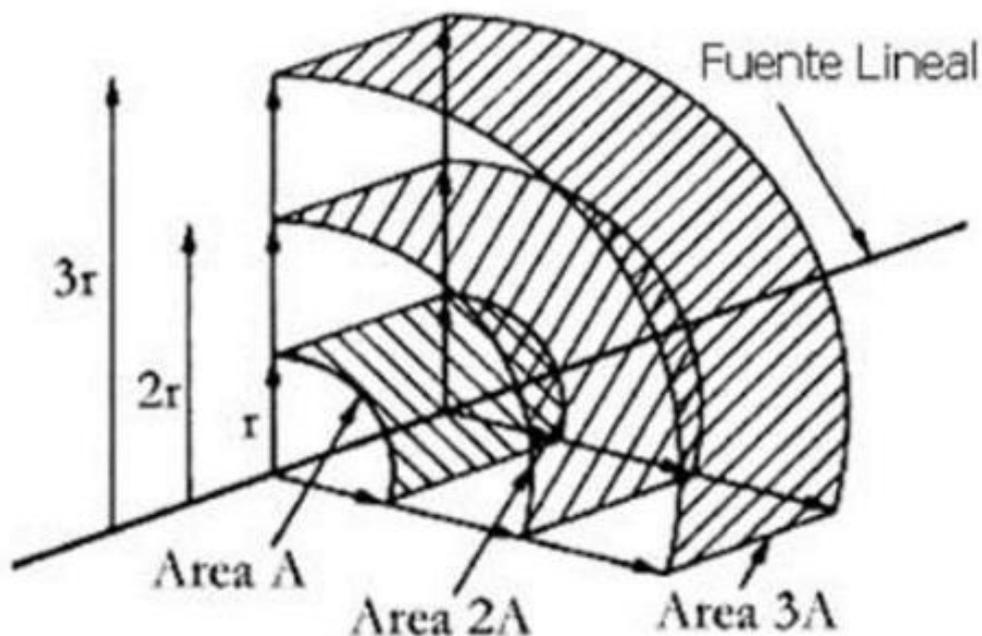


Diagrama 1 Descripción del comportamiento de una fuente sonora lineal.

Para poder realizar un buen estudio se debe tener valores índices para poder categorizar la condición en la que se encuentra y ver si es adecuada o no conforme a la normativa de seguridad ambiental.

Dentro de los índices para la medida del ruido ambiental se encuentran los siguientes:

- Nivel de Presión

Este índice varía a lo largo del tiempo y se expresa por L_A cuando se mide en decibelios A, que es lo habitual en estudios medioambientales. Para un lapso establecido se pueden obtener los valores máximos de este índice, siendo el valor más alto el que representa el ruido de mayor presión sonora.

- Nivel de Presión Sonora Continuo Equivalente

Se trata del índice más utilizado para medir las molestias de ruido ya que este expresa la media de la energía sonora percibida por un individuo en un intervalo de tiempo, dicho en otras palabras, representa el nivel de presión que habría sido producido por un ruido constante con la misma energía que el ruido generalmente percibido, durante el mismo intervalo de tiempo. Solo que este índice siempre debe ir acompañado siempre de la indicación del periodo de tiempo al que se refiere.

- Niveles Percentiles (L_N)

Se trata de la variación del nivel de presión sonora en un período de tiempo dado puede registrarse, y descomponer el período de medida en intervalos constantes para cada uno de los cuales se obtienen sus correspondientes niveles de presión sonora.

- Nivel de Ruido Día-Noche (L_{dn})

Este índice fue creado en el año 1972, la agencia Americana de Protección del Medio Ambiente (EPA) adoptó el L_{dn} propuesto como método para evaluar la molestia del ruido sobre la población, tomando como base la subdivisión del período en dos partes: Día y Noche.

Este parámetro se define como el nivel equivalente en un periodo de 24 horas, pero teniendo un peso diferente para los niveles diurnos y nocturnos de ruidos. Se define con la expresión siguiente:

$$L_{dn} = 10 * \log \left(\frac{1}{24} \left(15 * 10^{\frac{L_d}{10}} + 9 * 10^{\frac{L_n+10}{10}} \right) \right)$$

Donde:

L_d es el nivel equivalente diurno entre 7:00 y 22:00

L_n es el nivel equivalente nocturno entre 22:00-7:00

- Nivel de Ruido Día-Tarde-Noche (L_{den})

Se trata de un índice similar al anterior solo que en esta parte se divide en tres intervalos de tiempo: día de 7 a las 19 horas, tarde de 19 a 23 horas y noche de 23 a 8 horas. Se calcula con la siguiente fórmula.

$$L_{dn} = 10 * \log \left(\frac{1}{24} \left(12 * 10^{\frac{L_{dia}}{10}} + 4 * 10^{\frac{L_{tarde+5}}{10}} + 8 * 10^{\frac{L_{noche+10}}{10}} \right) \right)$$

- Indicador ambiental de Ruido (IAR)
En orden para medir el impacto del ruido ambiental se deben utilizar varios indicadores los cuales determinan niveles sonoros de acuerdo con estándares internacionales, debido a esto el IAR está basado en el indicador acústico L_{eq} (total) y está basado en los niveles que la Organización para el Desarrollo Económico y la Cooperación (OCDE) que recomienda para el ruido de día. Este indicador se trata de la relación directa entre la media de la energía percibida por el intervalo del tiempo transcurrido entre 65dB, que corresponde al nivel recomendado por la OCDE.

$$IAR = \frac{L_{EQ}(total)}{65 \text{ dB}}$$

En base a estos índices se puede elaborar lo conoce como Mapa de Ruido.

Mapa de Ruido.

Estos mapas de ruido son una representación gráfica del perfil de ruido de un área geográfica determinada, en la cual los niveles sonoros se indican como curvas de nivel, y como algo extra estos mapas pueden mostrar como varía la distribución espacial de los niveles de ruido a lo largo del tiempo.

La utilidad de estos mapas radica en que tienen muchas aplicaciones potenciales como:

- Identificación de niveles de ruido dentro de ciudades.
- Identificación de áreas de mayor exposición acústica
- Servir como una base para adoptar acciones para reducir los niveles de ruido
- Ser una importante herramienta para la educación ambiental.

Gracias a los mapas de ruido permiten realizar una evaluación objetiva de la realidad acústica existente en una zona determinada, para esto se puede realizar un estudio en entorno concreto mediante los indicadores de ruido, tales como:

- La superación de los niveles límite en la zona de estudio.
- La cantidad de viviendas, colegios u hospitales sometidos a determinados niveles de ruido.

La precisión que puede llegar a tener un ruido solamente está limitada con la exactitud de datos de entrada, por lo tanto, se debe verificar que la información obtenida sea coherente con la situación analizada. Y para realizar

la calibración del mapa se debe asegurar que las fuentes de ruido no hayan sido influenciadas por los ruidos extraños.

Para realizar un mapa de estudio del tráfico ferroviario se requieren los siguientes datos de entrada:

- Del tráfico ferroviario:
 - Número y tipo de trenes.
 - Promedio de velocidades de sirenas.
 - Estructuras de tren (en nivel encortes, o terraplenes).
 - Tipo de rieles, balastos y lazos-
 - Estructuras de puentes.
- Del entorno físico.
 - Cobertura del suelo y bosques
 - Edificios
 - Obstáculos
 - Factores meteorológicos
- Demografía
 - Información de uso del suelo y límites de ruido aplicables.
 - Estructura de la población.
 - Construcción y uso.
 - Los planes futuros sobre el área.

Para la realización de los mapas de ruido se requieren de los sistemas de información geográfica (SIG) los cuales se tratan de modelos computacionales que sirven para la gestión, análisis y representación de una realidad geográfica mediante un conjunto de datos.

Cabe recalcar que los SIG complementan las funciones de tratamiento geográfico de los programas de simulación acústica e incluyen herramientas específicas de tratamiento geográfico que facilitan la creación modelo acústico completo para su exportación.

Normativa y legislación en temas acústicos.

Ya que se sabe cómo calcular los diferentes índices para formar los mapas de ruido y lo que significan se debe de conocer las normativas que se tienen a nivel mundial del tema de contaminación acústico

Organización Mundial de la Salud (OMS)

La OMS ha recomendado varios valores límites de emisión de ruido de acuerdo con el lugar y hora de exposición, por ejemplo, en un ambiente laboral, el tiempo de exposición máximo no deberá exceder de 8 horas si el nivel sonoro es mayor que el recomendado. Ahora se mostrará una tabla del valor Leq recomendado por la OMS en el 2007

Tipo de ambiente	Leq dB(A)
Escolar exterior	55
Dormitorio	30
Exterior residencial diurno	55
Exterior residencial Nocturno	50

Tabla 1 Límites de Leq dB(A) recomendados por la OMS (OMS, 2007)

Organización de Cooperación y Desarrollo Económico (OCDE)

La organización de cooperación y Desarrollo Económico al igual que la OMS tiene sus propias propuestas de los valores límites respecto al ruido, específicamente del transporte de carreteras, siendo esta la siguiente tabla:

Niveles aceptables propuestos por la OCDE Leq dB(A). Límites en fachadas)	
Leq(día) dB(A).	Leq(noche) dB(A).
65 +/-5	55-60

Tabla 2 Límites fijados de Leq dB(A) por la OCDE a mediano plazo (OCDE, 2008)

Normativa Nacional

La ley que establece los criterios referentes a los impactos ambientales es la Ley general de Equilibrio Ecológico de Protección al Ambiente (LGEEPA). Dentro del Capítulo VIII relativo a Ruido, vibraciones, energía térmica y lumínica, olores y contaminación visual, en el artículo 155 sostiene que: Quedan prohibidas las emisiones de ruido, vibraciones, energía térmica y lumínica y la generación de contaminación visual, en cuanto rebasen los límites máximos establecidos en las normas oficiales mexicanas que para ese efecto expida la Secretaría de Salud, considerando los valores de concentración máxima permisibles para el ser humano de contaminantes en el ambiente que determine la Secretaría de Salud. Las autoridades federales o locales, según su esfera de competencia, adoptarán las medidas para impedir que se transgredan dichos límites y en su caso, aplicarán las sanciones correspondientes.

En la construcción de obras o instalaciones que generen energía térmica o lumínica, ruido o vibraciones, así como en la operación o funcionamiento de las existentes deberán llevarse a cabo acciones preventivas y correctivas para evitar los efectos nocivos de tales contaminantes en el equilibrio ecológico y el ambiente.

En el artículo 156 sostiene que las normas oficiales mexicanas en materias objeto del presente, establecerán los procedimientos a fin de prevenir y controlar la contaminación por ruido, vibraciones, energía térmica, lumínica, radiaciones electromagnéticas y olores, y fijarán los límites de emisión respectivos.

La Secretaría de Salud realizará los análisis, estudios, investigaciones y vigilancia necesaria con el objeto de localizar el origen o procedencia, naturaleza, grado, magnitud y frecuencia de las emisiones para determinar cuándo se producen daños a la salud. La Secretaría, en coordinación con organismos públicos o privados, nacionales o internacionales, integrará la información relacionada con este tipo de contaminación, así como de métodos y tecnología de control y tratamiento de esta.

Ahora en cuanto a las normas oficiales mexicanas se tienen las siguientes Normas:

NOM-079-SEMARNAT-1994

Establece los límites máximos permisibles de emisión de ruido de los vehículos automotores nuevos en planta, expresados en dB(A) y su método de medición conforme a su peso bruto. En la siguiente tabla se pueden apreciar los valores.

Peso Bruto Vehicular (kg)	Límites Máximos Permisibles Leq dB(A)
Hasta 3,000	79
De 3,000 hasta 10,000	81
Más de 10,000	84

Tabla 3 Límites de Leq dB(A) establecidos de acuerdo con el Peso Bruto Vehicular en planta (NOM-079-

NOM-80-SEMARNAT-1994

Establece los límites máximos permisibles de emisión de ruido proveniente del escape de los vehículos automotores, motocicletas y triciclos motorizados en circulación, expresados en Leq dB(A) y su método de medición, de acuerdo con el peso bruto vehicular o al desplazamiento del motor en centímetros cúbicos. Los límites máximos se presentan en la siguiente tabla.

Peso Bruto Vehicular (kg)	Límites Máximos Permisibles Leq dB(A)
Hasta 3,000	86
De 3,000 hasta 10,000	92
Más de 10,000	99

Tabla 4 Límites de Leq dB(A) establecidos de acuerdo con el peso bruto vehicular en circulación (NOM 080-SEMARNAT-1994, 199

NOM-081-SEMARNAT-1994

Establece los límites máximos permisibles de emisión de ruido que genera el funcionamiento de fuentes fijas y el método de medición por el cual se determina el nivel emitido al ambiente. En la tabla 20 se presentan estos valores.

Horario	Límites Máximos Permisibles Leq dB(A)
6:00 hr a 22:00 hr	68
22:00 hr a 6:00 hr	65

Tabla 5 Límites establecidos por la NOM-081-ECOL-1994 de acuerdo con la hora. (NOM-081-ECOL-1994,

También se tienen la siguientes Normativa Técnica Mexicanas en Materia de Ruido.

NMX-AA-040-1976 Clasificación de Ruidos.

En esta Norma se establece una clasificación de los sonidos que por su indeseabilidad son considerados como ruidos, de acuerdo con su presentación temporal y conforme a su estructura de componentes.

El ruido de origen ferroviario.

Debido a las peculiaridades del ferrocarril generalmente el promueva de ruido que genera es considerado menor que al del ruido del tráfico carretero y aeroportuario. Estas peculiaridades se pueden definir como que se tienen un

menor número de vehículos que los que transitan en el medio carretero y que afecta negativamente a pocas zonas en un ambiente urbano.

Estas zonas que son afectadas en ámbito urbano usualmente se pueden categorizar en tres tipos en base al tipo de uso de suelo:

- Zonas de exteriores sensibles al ruido
 - Parques, Sitios históricos, anfiteatros, Cementerios.
- Residencias
 - Residencias unifamiliares o multifamiliares.
- Sitios de interior sensibles al ruido.
 - Lugares de adoración, escuelas, hospitales, bibliotecas, etc.

El ruido que es generado por el sistema ferroviario se puede agrupar en dos grandes fuentes: el ruido que depende del movimiento del tren y el ruido que no depende de esto. Dentro de las principales fuentes de ruido de un tren se encuentran las siguientes:

- Ruido de rodadura.
Se produce por el contacto entre las ruedas del tren y las vías, el cual puede ser causado por los pequeños desajustes y el desgaste irregular de la rueda ya que estas generan la aparición de vibraciones que a su vez vuelven a incrementar estos desajustes y vibraciones.
- Ruido de tracción.
Es aquel procedente de la máquina tractora.
- Ruido de equipamiento auxiliar.
Formato por ventiladores, compresores y los sistemas de frenado.
- Ruido aerodinámico.
Producido por el paso del tren en contacto con el aire.

Ahora tocando más a fondo los temas de los ruidos en específico del tren:

Ruido Producido por el desplazamiento del tren.

De manera sencilla se puede definir como el ruido generado por la vibración de la rueda y el riel al rodar una sobre otra. Debido a que el tren no dispone de sistemas de dirección este es dirigido por acción de las pestañas de las ruedas, de manera que cuando transita en un tramo recto no genera ruidos, cuando entre en una curva es cuando el rozamiento de la pestaña genera el sonido conocido como "squeal noise".

Efectos de la Corrugación

Para algunos trenes su sistema de frenado se basa en la colocación de bloques de acero situadas de forma diametral, que cuando se accionan hacen contacto con la superficie de rodadura de la rueda presionándola y reduciendo así su velocidad. Debido a las velocidades que alcanzan las ruedas al entrar al contacto con los bloques de acero se genera mucha energía en calor, lo cual puede llevar a calentar la rueda a tal punto que se genere una deformación.

Esta deformación tiene como consecuencia un aumento de la vibración generado por el tránsito del tren y por lo tanto un aumento en el ruido generado con la marcha de este.

Y estas deformaciones se les puede dar el nombre de corrugación cuando aparecen ondulaciones superficiales, tanto en la rueda como en el raíl.

Ruido de Impacto

Es producido por dos motivos principales. El primero se trata cuando las ruedas presentan alguna parte plana debido a alguna incidencia y el segundo sucede cuando las juntas o cambios de vía se presentan en el trayecto.

Ruido en Curvas

Como se explicó anteriormente solo se presenta ruido en las curvas debido al contacto de la rueda con el raíl de manera intensa a comparación de cuando viaja en un trayecto plano. Este ruido puede tener tres posibles causas.

- Arrastre lateral de la rueda sobre la vía.
Son pequeñas oscilaciones laterales del convoy que propician este movimiento
- Rozamiento entre la pestaña de la rueda y la parte inferior de la vía.
Se trata de un fenómeno no evitable al no poseer dirección el convoy.
- Arrastre de la rueda sobre la vía.
Usualmente sucede sobre la rueda exterior de la curva.

Cuanto más cerrada sea la curva más grande será el esfuerzo mecánico que deben hacer las pestañas de la rueda que deslizan sobre el raíl, y, por tanto, más elevado será el nivel sonoro.

Características del ruido Ferroviario.

Para fines prácticos y poder realizar un análisis del ruido ferroviario se puede considerar que un tren se comporta como un dipolo acústico, que emite de forma direccional en un ángulo de 60° de apertura, como se representa en la figura:

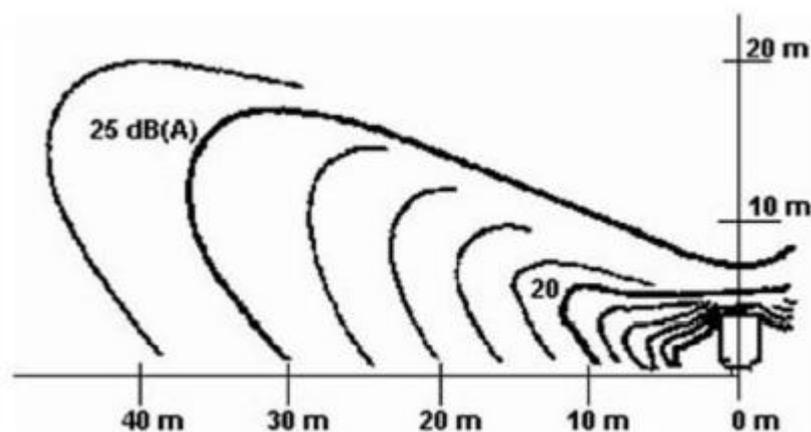


Figura 1 Directividad vertical de un tren.

Como se puede observar presenta dos direcciones:

- En la dirección horizontal para evaluar el nivel L_{den} no tiene ninguna influencia.
- En la dirección vertical tiene una importante función la altura del punto receptor, esto es importante tomarle en consideración para la aplicación de barreras acústicas.

Para poder realizar el cálculo de la atenuación debida a la directividad vertical se puede hacer con la siguiente ecuación empírica

$$\Delta a = Aa + B$$

Donde:

Δa Es la atenuación en dB(A) asignada a un ángulo a (superior a 30°).

A y B Son coeficientes, el valor de los cuales después de muchas mediciones es de $A=0.15$ y $B=4.5$

Para poder seguir con los cálculos se requiere calcular en nivel equivalente L_{eq} que contempla el tiempo de exposición al sonido en un receptor. Este tiempo será la duración entre el instante de aparición del ruido y su disipación. El tiempo de disipación depende de varios factores como el ruido de fondo en la zona y el peso del ferrocarril que pasa.

Por convenio se ha llegado adoptar que el tiempo de exposición es el tiempo en el cual el nivel sonoro no difiere más de 10 dB, respecto del nivel máximo L_{max} .

Medidas de control del ruido del ferrocarril.

Conforme se desarrolló el sistema ferroviario se le ha dado un mayor énfasis a la contaminación acústica que se genera por el uso del medio, ya que en décadas pasadas las poblaciones de las grandes urbes todavía no alcanzaban a asentarse de manera cercana a las vías del tren, pero hoy en día ya es lo contrario.

Para esto se han diseñado medidas de mitigación que van no solo de construcción de infraestructura alrededor de las vías, sino que también incluye prácticas de mantenimiento o el uso de aditamentos en los vehículos.

Enseguida se muestra una tabla con las medidas de mitigación que se recomiendan:

Medida de Mitigación	Reducción de Ruido dB(A)	Reducción de vibración dB
Reducción en la fuente – de forma permanente		
Fijaciones de carril resilientes	3 a 6	5 a 10
Sistema Ferroviario Integrado	3 a 10	8 a 18
Amortiguadores de riel	5 a 6	7 a 9
Durmientes de madera	1 a 2	3 a 5
Almohadillas bajo durmientes	0 a 3	8 a 15
Aumento en espesor de cama de balastro	3 a 5	0 a 6
Esferas de balastro	8 a 18	10 a 15
Eliminación de discontinuidades superficiales en el carril de rodadura	6 a 10	0 a 5
Mantenimiento de la superficie del riel	10 a 15	10 a 20
Reducción en origen – vehículos ferroviarios		
Rueda reperfilada	5 a 10	5 a 10
Reducción de la velocidad	3 a 7	3 a 6
Frenos de disco	10 a 15	-
Frenos compuestos	8 a 10	-
Ruedas Resilientes	3 a 20	3 a 4
Reducción de propagación.		
Barreras	10 a 15	0 a 14
Túneles	0 a 30	10 a 40

Tabla 6 Efectos de las medidas de mitigación para ruido y vibraciones

Como se puede observar en la tabla anterior las medidas de mitigación que más efectivas llegan a ser se tratan de las barreras y túneles, por lo que a continuación al menos hablara de los diferentes tipos de barreras acústicas que existen.

Barreras acústicas de altura completa

Se trata de barreas con una altura mayor a un metro. Cuando se instalan a lado de las vías de un ferrocarril, estas se instalan no más cerca de los postes de señales, postes de electrificación, etc. Debido a su facilidad y conveniencia se tratan de las formas más comunes de mitigación del ruido en el sector ferroviario.

La forma en que las barreas mitiga el ruido es mediante la reflexión del sonido, su absorción o la transmisión del sonido sobre la arista de la barrera.

Agrupando las ventajas y desventajas de este tipo de barreras en una tabla:

Ventajas	Desventajas
Ya se tiene un diseño, aplicación y ejecución bien definido en el sector ferroviario	Para trenes de alta velocidad se requieren barreras de al menos 4 metros de altura.
No requieren de mucho espacio por su pequeña huella física	No son muy agradables a la vista y se tiene una pérdida del nivel de luz en la zona.
Pueden ser utilizadas solas o complementarse con otras medias de mitigación.	Se tiene una pérdida de seguridad por la restricción/prohibición de salidas de emergencia.
-	Tienen un costo en mantenimiento considerable debido al vandalismo que reciben,
-	Obstruye el paso de la vida silvestre por lo que se debe de plantear en el diseño corredores de vida silvestre.

Tabla 7 Ventajas y desventajas de las barreras acústicas de altura completa.

Barreras acústicas de baja altura.

Se tratan de barreras que tengan menos de 1 metro de altura y se utilizan localizándolas muy cerca de los extremos de las vías.

Hay varios diseños de barreras acústicas de baja altura entre ellos están se pueden encontrar diseños de concreto armado, gaviones de piedra o perfiles de aluminio prefabricados,

Agrupando las ventas y desventajas de este tipo de barreras en una tabla se tiene lo siguiente:

Ventajas	Desventajas
Ocupan un espacio menor que las barreras de altura completa	No son efectivas para trenes que viajan a velocidades mayores a 340 km/hr
Tienen un costo menor y son menos vandalizadas que las barreras de altura completa.	No se tiene todavía analizado a fondo el rendimiento de estas barreras.
Son fáciles de remover cuando se requiere dar mantenimiento a las vías.	
Se puede integrar de manera sencilla en entornos naturales.	

Tabla 8 Ventajas y desventajas de las barreras acústicas de baja altura.

Conclusiones del estudio

Después de realizar el análisis correspondiente el autor de la tesis hayo que del tramo de 2 km analizado al menos un tramo de 200 metros infringía en las normativas mexicanas del control de contaminación acústica por lo que se propuso la construcción de una barrera acústica Gavión para así beneficiar a una población de 8290 personas.

De esto se puede observar que realmente del trayecto analizado un 10% del tramo no cumplía con la normativa y por eso una cantidad considerable de

personas sufrían afectos adversos que podrían llegar a disminuir su calidad de la vida. Y estas personas probablemente no estaban conscientes del daño que les hacía que este tramo de la vía férrea no haya tenido las consideraciones correctas para protegerlas de su contaminación acústica.

Estudio de impacto: Evaluación de huella de carbono.

Para poder evaluar la huella de carbono la Unión Internacional de vías férreas (UIC) realizó un estudio con la finalidad de establecer la metodología para poder cuantificar cuanta contaminación genera el medio ferroviario haciendo una equivalencia a emisiones de carbono.

Indicadores de medición

Para este estudio se utilizan 6 indicadores clave los cuales son:

Energía primaria

La energía primaria incluye la energía directa consumida para las operaciones del tren, así como la energía utilizada para la producción de esta energía, es decir, la energía requerida para obtener los recursos necesarios para obtener los combustibles como el diésel; también incluye las pérdidas de energía que se pierden al ambiente.

Su unidad de medida son los Mega Joules, o la unidad correspondiente en otro sistema de unidades.

CO₂

Los efectos de gases invernadero usualmente es causado por la emisión de gases de dióxido de carbono, el cual se obtiene de la quema de combustibles fósiles, debido a esto es importante conocer la cantidad de CO₂ que es emitida a la atmósfera por los sistemas de transporte.

Partículas PM₁₀ y PM_{2.5}

Este indicador se refiere a todos los sólidos o partículas líquidas que se encuentran flotando en el aire que van desde los 10 micrómetros (PM₁₀) hasta los 2.5 micrómetros (PM_{2.5}) de diámetro que debido a su tamaño no se asientan inmediatamente en el terreno.

Estas partículas presentan un problema de salud considerable ya que pueden generar en las personas irritaciones en las vías respiratorias, y si se trata de personas vulnerables como son las personas que padecen de enfermedades crónicas como el asma pueden llegar a ser hospitalizadas por la severidad de su enfermedad. Y finalmente la unidad de medida de este indicador es el gramo.

Compuestos orgánicos volátiles que no son metano (NMVOC)

Los compuestos orgánicos volátiles se tratan de materiales orgánicos que se vaporizan de manera fácil y existen en forma gaseosa a bajas temperaturas. Por estas razones el gas metano es excluido de este grupo.

La importancia de estos compuestos radica que son los precursores de la generación a nivel de tierra del ozono, así como algunos de estos compuestos como el benceno son considerados cancerígenos.

Óxidos de Nitrógeno

Los óxidos de nitrógeno son formas gaseosas del nitrógeno que se encuentra enlazado a moléculas de oxígeno.

Su importancia radica en que tienen diversos efectos adversos a la salud, por ejemplo, el óxido de nitrógeno reacciona con la humedad del aire para formar ácido nítrico que ayuda a la formación de la lluvia ácida. Y finalmente su unidad de medición es el gramo.

Consideraciones para realizar el modelaje

Principalmente se tienen que definir los confines del sistema, los cuales se pueden definir en 4 grandes grupos:

- Procesos previos a la implementación del sistema
Estos pueden ser como la producción del sistema de la energía de tracción y estacionaria.
- Flora vehicular
Se centra en la construcción, operación y mantenimiento de locomotoras, vagones y furgones.
- Sistema de vía
Se centra en la construcción, operación y mantenimiento de las vías férreas, puentes, túneles, equipo de catenaria, subestaciones, telecomunicaciones y señalizaciones, equipo de energía y edificios.
- Otras edificaciones
En estas se incluyen la construcción, operación y mantenimiento de las estaciones ferrocarriles, así como las terminales.

Así mismo se tiene que considerar la vida útil que tendrán los elementos que conforman al sistema para eso la metodología nos brinda la siguiente tabla con la información relevante de la vida útil de diversos elementos del sistema ferroviario:

Elemento	Vida útil (años)
Rieles para las vías	30
Trabajo de cortes y terraplenes	60
Durmientes (Concreto)	35
Durmientes (Madera)	30
Durmientes (Acero)	30
Durmientes de vía cerrada	30
Puente, viaducto	60
Puente, concreto	60
Puente, hierro	60
Túnel, de cielo abierto	60
Túnel, minero	60
Edificio de intersección de trenes de interciudades	60
Edificio de intersección de trenes locales	60
Edificio de parada de trenes locales	60
Edificio de estación de trenes	60
Edificio de sitio de mantenimiento y reparación	60
Edificio de subestación eléctrica y transformadores	60
Instalaciones eléctricas de la subestación eléctrica	15

Tabla 9 Tiempo de vida útil de los elementos del sistema ferroviario.

Modelación de impacto de la infraestructura

Debido a que la infraestructura de las vías férreas requiere de elementos que tienen diferentes tiempos de vida útil las huellas de carbono deben ser calculados, para poder conocer el impacto ambiental de la estructura se hace de la siguiente manera:

1. Se analiza un módulo específico (Ya sea una unidad o un kilómetro) para estimar el flujo del material, el transporte necesario y las emisiones de las construcciones por si solas y adicionalmente se requiere calcular el material requerido para el mantenimiento en un base anual.
2. La suma de todos los materiales y las emisiones debe ser multiplicada por los respectivos factores de impacto de la base de datos de Ecoinvent
3. El impacto general debe ser dividido por el promedio de vida útil de cada elemento con la finalidad de obtener el impacto por kilómetro por año, o de manera general, por unidad o por año.
4. En este paso se incluye la multiplicación del módulo específico de emisiones por el número de módulos considerados en la red.
5. Se tiene que asignar el impacto para cada tipo de transporte en el sistema (Transporte de pasajeros de carga), esta asignación se realiza por medio de la ton-km. Por lo tanto, se tiene que dividir las emisiones

totales de la red por año por el rendimiento total del transporte de la red,

6. Finalmente se tiene que calcular la unidad de pasajero kilometro o la tonelada neta por kilómetro.

Modelación de impacto del material rodante.

Se puede definir en los siguientes pasos.

1. Se realiza la estimación de impacto ambiental del vehículo de producción, mantenimiento y su disposición final.
2. Se realiza la división del impacto a través del rendimiento del transporte en tonelada neta por kilómetro.
3. Se debe determinar el índice de ton neta-km entre ton-km y en el caso de pasajeros se tiene que hacer pasajero neto-km entre pasajero por kilómetro.

Modelación de impacto de operación del tren,

Para la realización de este análisis se realiza de arriba hacia abajo, esto mediante el análisis del consumo general de la energía de los trenes desde sus respectivos factores de emisiones. Esto se realiza en los siguientes pasos:

1. Se determina el consumo de energía, esto mediante el consumo de energía y la base de datos de CO₂ del UIC.
2. Se determina la mezcla eléctrica, de acuerdo con la energía UIC y el CO₂ de la base de datos o de la mezcla nacional de energías.
3. Se realiza la multiplicación del consumo de energía con sus respectivos factores de emisión.
4. Se realiza la división del impacto ambiental con el rendimiento en pasajero kilometro o tonelada neta kilometro.

Datos y tablas importantes para el análisis.

La siguiente tabla muestra los valores establecidos por Ecoinvent para los valores de emisión:

Uso	Nombre Ecoinvent-DS	Unidad	CO ₂	CED ¹⁴	PM ₁₀	SO ₂	NO _x	NVMOC
			Kg	MJ	g	g	g	g
Trabajos para excavaciones	Excavación, excavadora hidráulica	m ³	0.5	8.1	0.6	0.8	6.1	0.9
Balasto	Grava aplastada en mina	Ton	4.1	138	4.7	9.5	22.1	4.2
Durmiente de concreto, Estaciones y Edificios	Concreto hecho en planta	m ³	317	1782	57	203	558	82
Tubos de radio y rieles	Acero producido en planta	kg	1.5	23,3	4.5	3.2	3.3	0.5
Línea de contacto aéreo, subestación eléctrica, cables	Cobre almacenado en la región	Kg	1.7	34	19.5	103.3	21.3	3.7
Transporte de material general	Transporte de más de 32 ton	Ton-km	0.1	1.8	0.04	0.12	0.39	0.13
Transporte de material de relleno y excavación	Transporte en flete, riel o diésel	Ton-km	0.0	0.8	0.03	0.10	0.19	0.03

Tabla 10 Factores de emisión selectos de Ecoinvent v2.2

Trabajos de terracería

Para poder calcular las emisiones del trabajo de terracería se toman en cuenta las siguientes consideraciones:

- Una base una capa de grava y arena con una altura de 40 cm.
- Una anchura promedio para la renovación de líneas, siendo 6.6 m para una sola línea y 11 m para una de doble línea.
- Una anchura promedio para nuevas líneas considerando para una sola línea 8.6 m y una doble de 13.3 m.
- La densidad de la grava y arena de 2.8 ton/m³.

Entonces los valores de emisión de los trabajos son los siguientes:

Trabajo	Co ₂	CED ¹⁴	PM ₁₀	SO ₂	NO _x	NVMOC
	Kg/año*km	MJ/año*km	g/año*km	g/año*km	g/año*km	g/año*km
Trabajo de renovación de una vía.	1652	31815	1.63	2.77	18.29	2.58
Trabajo de renovación de una vía doble.	2753	53025	2.72	4.61	30.48	4.3
Trabajo de construcción de una vía.	5993	109103	6	10	68	10
Trabajo de construcción de una vía doble.	9791	176878	10.51	15.94	110.78	16.11

Tabla 11 Impacto de los trabajos de terracería por año y kilómetro.

Puentes

Para esta evaluación se consideran tipos de puentes: Viaductos con una longitud mayor a 250 m, puentes de concreto pequeños y puentes de hierro.

Para esto se considera la siguiente información para la construcción de los puentes:

- Material de construcción, para el viaducto por metro se usan 32.1 m³ de concreto, 3.51 toneladas de acero y 26.17 m³ de tierra excavada.
- Transporte del material de construcción a la zona de construcción.
- Energía requerida para la construcción, que se considera como 8.4 litros de Diesel por metro de puente.

Entonces los valores de emisión de los trabajos son los siguientes:

Tipo de puente	Co ₂	CED ¹⁴	PM ₁₀	SO ₂	NO _x	NVMOC
	Kg/año*km	MJ/año*km	g/año*km	g/año*km	g/año*km	g/año*km
Viaducto de una vía	154925	1485081	154	183	319	60
Viaducto de doble vía	258209	2475135	256	305	532	100
Puente chico de concreto de una vía	67534	646981	67	80	139	26
Puente chico de concreto de doble vía	112557	1078302	112	133	232	44
Puente de hierro de una vía	136412	2246780	468	352	332	54
Puente de hierro de dos vías.	227353	3744633	780	587	553	91

Tabla 12 Impacto por construcciones de puentes por año y kilómetro.

Túneles

Para esta evaluación se investigaron dos tipos de túneles: A cielo abierto y de mina. El túnel de cielo abierto se remueve la tierra encima de la construcción y posteriormente se vuelve a colocar, en el caso del túnel mina no se quita la tierra de encima.

Tomando en consideraciones la longitud promedios de Alemania que es de alrededor de 760 m se puede saber lo siguiente:

- Se estima que de material de construcción se usa aproximadamente por metro de túnel 37.2 m³ de concreto, 1.6 toneladas de acero y 128 m³ de material excavado.
- Para el transporte del material al sitio de construcción se estima que se transporta 20 km el concreto y el acero se transporta 300 km por medio de trenes.
- La energía requerida para la construcción de un túnel es de 2.2 MWh de electricidad y 140 litros de Diesel para las máquinas constructoras por m de túnel de mina.

Entonces los valores de emisión de los trabajos relevantes a los túneles son los siguientes:

Tipo de túnel	Co ₂	CED ¹⁴	PM ₁₀	SO ₂	NO _x	NVMOC
	Kg/año*km	MJ/año*km	g/año*km	g/año*km	g/año*km	g/año*km
Cielo abierto, una vía.	285351	3037296	434.02	422.09	639.60	103.98
Cielo abierto, dos vías.	475585	5062160	723.36	703.49	1065.99	173.30
Túnel minado, una vía	169619	1591132	137	209	378	59
Túnel minado, dos vías	282699	2651887	229	348	630	99

Tabla 13 Impacto por construcciones de túneles por año y kilómetro.

Balastos y durmientes

Para conocer los datos de emisión de los durmientes se consideraron 4 tipos de durmientes:

- Durmientes de concreto.
- Durmientes de madera.
- Durmientes de hierro.
- Durmientes de línea cerrada.

Para la construcción de los durmientes se toma en consideración lo siguiente:

- Material de construcción, para la construcción de un durmiente de concreto se usan 32.1 m³ de concreto, 3.51 toneladas de acero y 26.17 m³ de tierra excavada por cada unidad de durmiente de concreto.
- El transporte de material al sitio a unos 300 km y su disposición final en un vertedero.

Entonces los valores de emisión de los durmientes son los siguientes:

Tipo de Durmiente	Co ₂ Kg/año*km	CED ¹⁴ MJ/año*km	PM ₁₀ g/año*km	SO ₂ g/año*km	NO _x g/año*km	NVMOC g/año*km
Concreto, una vía	5184	84827	6.03	9.77	17.32	3.13
Concreto, doble vía	10340	1690258	12.02	19.48	34.53	6.23
Madera, una vía	6328	337382	17	18	23	17
Madera, doble vía	12699.23	675774.38	33.47	35.63	46	33.99
Hierro, una vía	9778.93	171929.18	29.55	25.01	27.85	4.74
Hierro, una vía	19700.15	347121.78	59.22	50.38	56.42	9.59
Sin balasto, una vía	11285.45	118160.77	9.96	14.97	26.56	4.63
Sin balasto, doble vía	22166.12	226406.92	18.99	28.92	52.18	8.81

Tabla 14 Impacto por construcciones de balastos por año y kilómetro.

Rieles

Actualmente los rieles están fabricados con una aleación de acero de alta calidad, de manera general se puede definir que el peso del riel determina el tipo de vía que hay. Entre más pesados son rieles más rápido y pesado llegan a ser los trenes que pueden pasar en la vía.

Como en el mundo existen diversos tipos de perfiles de riel es conveniente definir cuales se usaron en la investigación de esta metodología siendo los siguientes modelos:

- S49, se trata de un perfil cuyo uso principal es en las vías viejas y regionales en Alemania.
- S54, se usa principalmente en líneas principales y especialmente en las vías de las estaciones.
- UIC se utiliza para líneas de alta velocidad o de alta carga.

Entonces los valores de emisión la construcción y colocación de los rieles son los siguientes:

Tipo de Riel	Co ₂ Kg/año*km	CED ¹⁴ MJ/año*km	PM ₁₀ g/año*km	SO ₂ g/año*km	NO _x g/año*km	NVMOC g/año*km
UIC 60, una vía	96974	18.29	13.43	13.80	2.18	96974
UIC 60, Doble vía	193948	36.58	26.87	27.60	4.37	193948
S49, una vía	79350	15	11	11	2	79350
S49, doble vía	158859	29.96	22.01	22.61	3.58	158859
S54, una vía	88584	16.81	12.32	12.58	1.99	88584
S54, una vía	176926	33.58	24.61	25.12	3.98	176926

Tabla 15 Impacto por fabricación y colocación de rieles por año y kilómetro.

Mástil, catenarias y cable colgante.

Las locomotoras eléctricas y sus respectivos vagones de carga reciben energía en su parte superior mediante un sistema de energía eléctrica el cual consiste

en 3 elementos, un mástil o poste de concreto o hierro, las catenarias y el cable que conducirá la energía eléctrica.

Entonces los valores de emisión del sistema de cuaternaria son los siguientes:

Tipo de Instalación	Co ₂	CED ¹⁴	PM ₁₀	SO ₂	NO _x	NVMOC
	Kg/año*km	MJ/año*km	g/año*km	g/año*km	g/año*km	g/año*km
Cable de Catenaria, una vía	353	6938	3.91	4.04	0.7	353
Cable de Catenaria, doble vía	706	13875	7.83	8.08	1.41	706
Mástil de concreto y cable colgante, una vía	1367	23578	3.02	3.04	0.68	1367
Mástil de concreto y cable colgante, doble vía	2734	47155	6.05	6.08	1.36	2734
Mástil de hierro y cable colgante, una vía	1235	21974	3.14	2.83	0.6	1235
Mástil de hierro y cable colgante, doble vía	2469	43948	6.28	5.65	1.2	2469
Cable colgante, una vía	536	10413	0.96	1.16	0.21	536
Cable colgante, doble vía	1071	20826	1.93	2.32	0.41	1'071

Tabla 16 Impacto por tipo de instalación de sistema de catenarias por año y kilómetro.

Señalización y comunicación

Para la sana operación de la vía férrea es esencia que se tenga una adecuada señalización y comunicación. En un principio las vías son divididas entre sectores individuales conocidos como zonas de sección, en las cuales solo puede entrar un tren si la sección se encuentra libre, esto se trata de un ejemplo de los elementos de comunicación en una estación.

Entonces los valores de emisión de los sistemas que componen a la señalización y comunicación son los siguientes:

Tipo de Instalación	CO ₂	CED ¹⁴	PM ₁₀	SO ₂	NO _x	NVMOC
	Kg/año*km	MJ/año*km	g/año*km	g/año*km	g/año*km	g/año*km
Señalamientos por km, una vía	33	548	0.09	0.08	0.02	33
Señalamientos por km, doble vía	56	914	0.14	0.14	0.03	56
Cable para telecomunicaciones, una vía	380	11632	3	3	1	380
Cable para telecomunicaciones, doble vía	634.47	19400.90	4.38	5.26	1.51	634.47
Drenaje de cables, una vía	295.21	2634.42	0.07	0.68	0.16	295.21
Drenaje de cables, doble vía	491.81	4388.95	0.12	1.13	0.26	491.81
Edificio de control del ferrocarril (Edificación)	226.96	3886.42	0.62	0.51	0.14	226.96
Edificio de control del ferrocarril (Instalaciones eléctricas)	965.43	20254.63	3.05	2.78	0.83	965.43

Tabla 17 Impacto por construcciones de señalizaciones y comunicaciones por año y kilómetro.

Construcción y mantenimiento de edificaciones

Debido a que el sistema de transporte ferroviario requiere de edificios para la entrada y salida, tanto de pasajeros, así mismo se requiere de edificios para realizar el mantenimiento de la red y de los trenes. Dentro de estas edificaciones se encuentran las siguientes

- Estación de trenes.
- Paradas para trenes locales
- Paradas para trenes de carga
- Sitios de mantenimiento y reparación.
- Transformadores de subestaciones eléctricas.

Entonces los valores de emisión de las edificaciones relevantes son los siguientes:

Tipo de Edificación	Co ₂	CED ¹⁴	PM ₁₀	SO ₂	NO _x	NVMOC
	Kg/año*k m	MJ/año*k m	g/año*k m	g/año*k m	g/año*k m	g/año*k m
Intersección para trenes interciudad.	164714	1310519	155	165	54	164714
Intersección para trenes locales.	68142	539044	47	68	22	68142
Paradas para trenes locales	10407	81429	7	10	3	10407
Sitios de mantenimiento y reparación	156005	1283304	113	159	55	156005
Subestación eléctrica, edificación.	122083	686672	22	78	31	122083
Subestación eléctrica, instalaciones	642	6482	0	1	0	642

Tabla 18 Impacto por construcciones de edificaciones y mantenimiento por año y kilómetro.

Construcción y mantenimiento de trenes

Para el análisis de trenes se recurrió a analizar cuatro trenes diferentes, desde su construcción hasta su funcionamiento, esto mediante el análisis de su impacto de huella de carbono relacionado con sus operaciones de movimiento de tonelada neta por kilómetro o pasajero neto por kilómetro.

Los trenes analizados por el estudio fueron los siguientes:

- Tren local de 171 toneladas, con una vida útil de 40 años y con un rendimiento de 150 000 km por año.
- Tren Interciudad de 317 toneladas, con una vida útil de 40 años y con un rendimiento de 500 000 km por año.
- Tren de alta velocidad de 664 toneladas, con una vida útil de 40 años con un rendimiento de 150 000 km por año.
- Tren de carga con una locomotora de 85 toneladas y 20 vagones de 22 toneladas cada uno con un factor de carga de 37% de un total de 58 toneladas por vagón, dando como resultado 429 toneladas de carga y un peso total del tren de 953 toneladas. Este tren tiene una vida útil de 40 años y poseyó un rendimiento de 40 000 kilómetros por año.

Entonces los valores de impacto de emisión para la construcción y mantenimiento de trenes son los siguientes en valores de unidad por año:

Tipo de Tren	Co ₂	CED ¹⁴	PM ₁₀	SO ₂	NO _x	NVMOC
	Kg/año*uni.	MJ/año*km	g/año* uni.	g/año* uni.	g/año* uni.	g/año* uni.
Regional	8982	234488	17.01	42.31	24.08	9.6
Larga Distancia	60463	1513825	61	212.87	124.89	125.41
Alta velocidad	95768	1998890	78.7	252.5	172.5	144.6
De carga	23756	459685	54.83	80	55.48	16.14

Tabla 19 Impacto por operación de tipo de tren por año y unidad.

Y finalmente estos valores, pero ahora expresados por tonelada neta por kilómetro:

Tipo de Tren	Co ₂	CED ¹⁴	PM ₁₀	SO ₂	NO _x	NVMOC
	Kg/año*km	MJ/año*km	g/año*km	g/año*km	g/año*km	g/año*km
Regional	0.35	9.142	0.663	1.65	0.939	0.374
Larga Distancia	0.381	9.551	0.385	1.343	0.788	0.791
Alta velocidad	0.288	6.021	0.237	0.761	0.52	0.435
De carga	0.623	12.059	1.438	2.099	1.456	0.423

Tabla 20 Impacto por operación de tipo de tren por año y kilómetro.

Operación del tren y alimentación de energía

Para el funcionamiento del tren no solo la locomotora requiere energía, todo el conjunto de tren y edificaciones la requieren. Para este análisis se han analizado las siguientes fuentes de energías:

- Carbón.
- Lignito.
- Gas natural.
- Petróleo.
- Energía Nuclear.
- Energía hidráulica.
- Energía Eólica.

Entonces los valores de impacto de las fuentes generadores de energía son los siguientes:

Tipo de Edificación.	Co ₂	CED ¹⁴	PM ₁₀	SO ₂	NO _x	NVMOC
	Kg/año*k m	MJ/año*k m	g/año*k m	g/año*k m	g/año*k m	g/año*k m
Intersección para trenes Inter-ciudad.	334.5	5093.9	172.2	1896.2	540.5	151
Intersección para trenes locales.	242.2	4518.5	6.3	95	159.2	100.3
Paradas para trenes locales	968.5	12799.8	82.9	909.8	980.9	65.1
Sitios de mantenimiento y reparación	1203.4	12805.9	71.4	631.5	835.2	30.7
Subestación eléctrica, edificación.	525.2	10190.5	12.6	301	501.5	311.3
Subestación eléctrica, instalaciones	856.4	12241.6	196.8	6704.9	2771.9	381.9

Tabla 21 Impacto por operación de tren por año y kilómetro.

El ferrocarril en comparación al autotransporte.

En el mundo actual se estima que el 20% de la energía primaria consumida a nivel mundial se destina al transporte de bienes y personas y esto se estima que genera un 25% de las emisiones totales de CO₂.

Debido a esto se tiene que buscar una mayor eficiencia energética en los ámbitos relevantes del transporte. Para llegar esta eficiencia energética se tienen que llevar a cabo diferentes acciones que reduzcan el consumo de energía mientras seguía manteniendo la satisfacción y calidad del transporte.

Para evaluar e incrementar la eficiencia energética en los temas de transporte la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) propone el enfoque ASI.

- A: Avoid. Evitar viajes y aumentar un sistema eficiente.
- S: Shift. Cambiar a una forma de movilidad más eficiente que aumente la eficiencia de los viajes.
- I: Improve. Mejorar la eficiencia del combustible en los modos de transporte, esto mediante el aumento de la eficiencia de los vehículos.

Ventajas del ferrocarril respecto al autotransporte.

En un terreno plano la fuerza horizontal requerida por el ferrocarril para desplazar una tonelada de peso es solo de 1 kg, mientras que en el autotransporte se requiere de entre 6 o 10 kg para generar el mismo movimiento. Desde un punto de vista de eficiencia el ferrocarril es 6 veces en el mejor de los casos que un vehículo de transporte de carga del transporte carretero y aunado a esto se tiene el ferrocarril tiene una emisión directa menor de contaminantes.

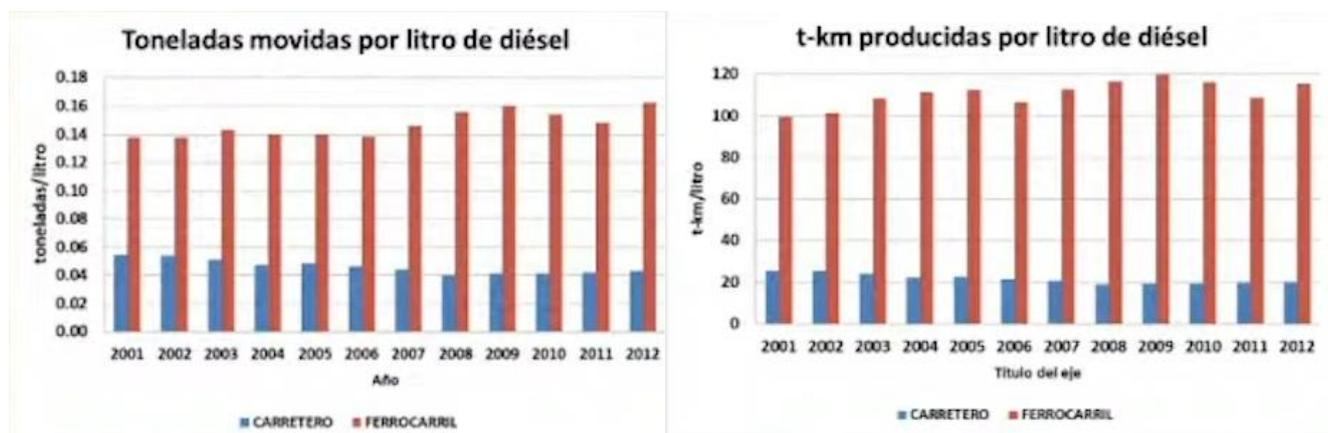
Para ilustrar que tanto es la diferencia entre el consumo eficiente del combustible la investigadora Gabriela García realizó las siguientes tablas que fueron expuestas en su conferencia "El ferrocarril, un pequeño aliado en el freno al cambio climático"



Gráfica 1 Consumo de diésel en el transporte de carga Basado en el Balance Nacional de Energía 2012; Anuario Estadístico SCT 2012 y Anuario Estadístico Ferroviario 2012

Como se puede observar el ferrocarril no ha tenido cambios relevantes en su consumo de Diesel, esto debido a que el crecimiento del sector ha sido casi nulo en este lapso ya que no se construyeron kilómetros de vía significativos.

Mientras tanto el sector del autotransporte muestra un incremento constante por lo que explica el incremento del 50% en los 12 años que se han analizado.



Gráfica 2 Reparto modal óptimo del transporte terrestre de carga en México.

Como se puede observar en la gráfica anterior la eficiencia del ferrocarril ha permanecido en un rango constante, mientras que la del autotransporte tuvo una tendencia a perder su eficiencia en cuanto al tema de Ton-km producidas por cada litro de diésel.

Para llegar a aumentar la eficiencia del combustible en el sector ferroviario se han tomado las siguientes medidas.

- Por parte de Ferromex se ha realizado una inversión en locomotoras con tecnologías más moderna que permiten funcionar con energía AC, las cuales se equivalen a 1.7 locomotoras de corriente directa.
- También se han implementado sistemas de encendido y apagado automático para las locomotoras de diésel con la finalidad de reducir el consumo de combustible y emisión de contaminantes.

Estudio: Greening North American Transportation Corridors

De acuerdo con la Comisión para la cooperación Ambiental se realizó el estudio de "Greening North American Transportation Corridors" en el cual se investigó un corredor que va desde Canadá hasta México con sus emisiones en el año de 2010 y una predicción para sus emisiones para el año 2035.

Sus resultados son:

Modo	Canadá	Estados Unidos	México	Total
Camión	531 mi (850 km)	1.624 mi (2597 km)	696 mi (1108 km)	2,847 mi (4555 km)
Ríeles	575 mi (920 km)	1,903 mi (3045 km)	717 mi (1147 km)	3,194 mi (5110 km)

Tabla 22 Distancias por modo de transporte del corredor de estudio.

Emisiones Anuales						
	Año	CO ₂	CO	NO _x	THC Total ³⁷	PM
		kilotoneladas	toneladas métricas	toneladas métricas	toneladas métricas	toneladas métricas
Camión	2010	13,508	10,7456	76,733	2,231	713
	2035	12,218	4,209	17,015	3,730	217
Tren	2010	177	480	2,866	161	100
	2035	278	756	2,821	177	113

Tabla 23 Emisiones anuales por movimiento de carga en el corredor CD. de México- Montreal

Como se puede observar del estudio las emisiones que tiene el ferrocarril respecto al autotransporte a lo largo del corredor que va de la ciudad de México hasta Montreal es muchísimo menor especialmente en el caso de los óxidos de nitrógeno que genera solamente un 3.73% en el año de 2010.

De esto se puede observar que el contaminante en el que se asemeja más del sector ferroviario al sector del autotransporte son las partículas volátiles PM que en el año de 2010 el ferrocarril emitía solo un 14%, pero se espera que para el año 2035 el ferrocarril emita un 52% del total de partículas emitidas del autotransporte.

De observar todas las emisiones se puede observar que el ferrocarril tiene una cantidad mucho menor de contaminantes, agrupando las relaciones por año de las emisiones del ferrocarril respecto al autotransporte.

	CO ₂	CO	NO _x	THC Total ³⁷	PM
2010	1.31%	0.45%	3.74%	7.22%	14.03%
2035	2.28%	17.96%	16.58%	4.75%	52.07%

Tabla 24 Comparación de emisiones entre el corredor ferroviario y el correo del autotransporte.

Como se puede observar la comparación de emisiones del ferrocarril respecto al autotransporte es gigantesca y aunque en un futuro se estima que se reduzca esta relación sigue siendo considerable. Con esta evidencia se puede comprobar que tan amigable es el ferrocarril respecto al autotransporte en cuanto a emisiones de gases.

Tendencias futuras del ferrocarril en el tema ambiental.

Actualmente se observa que la mayoría de las tendencias en el ferrocarril tienden a la descarbonización del sistema. Ya sea mediante la adopción de locomotoras totalmente eléctricas como lo hace Union Pacific que en enero de 2022 anuncio que planeaba la compra de 20 locomotoras de batería eléctrica con la finalidad de realizar movimientos de acomodo en sus estaciones para reducir la dependencia al combustible fósil como es el Diesel.

De manera similar California Sierra Northern Railway tiene planeado el desarrollo de locomotoras Switcher que funcionen a base de hidrógeno para realizar las maniobras de movimiento de furgones dentro de su red ferroviaria es un buen ejemplo para el resto de las compañías de ferrocarriles.

Mientras tanto en otros países como Reino Unido e India se plantean la alimentación de energía en base a la energía solar tanto para las estaciones como para los mismos sistemas del tren. En el caso de Reino Unido recientemente se aprobó la construcción de un parque solar que se destine la energía directamente a la red ferroviaria de la compañía Sussex.

Y finalmente en el caso de India se han implementado paneles solares a los vagones de pasajeros de diferentes redes con la finalidad de alimentar los sistemas de ventilación y otros equipos de los trenes.

Referencias

Brown, H. (1999). *Trenes de Vapor*. Ultramar.

Albino, I. (2015). *MONITOREO Y MITIGACIÓN ACÚSTICA EN AEROPUERTOS Y VÍAS FÉRREAS (MAESTRO)*. UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIHUAHUA FACULTAD DE INGENIERÍA.

Tuchsmid, M., Knörr, W., Schacht, A., Mottschall, M., & Schmied, M. (2011). *Carbon Footprint and environmental impact of Railway Infrastructur*. Berñom, Berlin: Öko-Institut e.V. .

Manthey, N. (31 de enero de 2022). Union Pacific Rail to test battery-electric locomotives. Electrive. Recuperado el 14 de mayo de 2022

Burns, A. (27 de enero de 2022). Electric Locomotives: History, Types, And Survivors. American rails. Recuperado el 15 de mayo de 2022 de <https://www.american-rails.com/electric.html>

Burns, A. (31 de marzo de 2022). Diesel Locomotives: History, Models. And Manufacturers. American rails. Recuperado el 15 de mayo de 2022 de <https://www.american-rails.com/diesel.html>

Tina, C. (25 de marzo de 2021), All Eyes On \$4 Million Diesel-Killing Hydrogen Locomotive In California. CleanTechnica. Recuperado el 17 de mayo de 2022 <https://cleantechnica.com/2021/03/25/all-eyes-on-4-million-diesel-killing-hydrogen-locomotive-in-california/>

Ridng Sunbeams, (23 de noviembre de 2020), Pioneering solar rail company awarded £2.5 million grant to build community solar farm to power rail network, Riding Sunbeams. Recuperado el 18 de mayo de 2022 de <https://www.ridingsunbeams.org/18092020-solar-trains-pioneer-receives-its-first-commercial-funding>

Gabriela, G. (24 de agosto del 2021). El Ferrocarril, un pequeño aliado en el freno al cambio climático [Conferencia en Youtube]. Instituto Mexicano del Transporte. Recuperado el 01 de mayo de 2022 de <https://youtu.be/OZ7Qm-V9iss>